Title	複雑な相互作用をする粒子の集団の流れ(基研研究会「統計物理の展望」,研究会報告)
Author(s)	粟津, 暁紀
Citation	物性研究 (1999), 71(4): 628-629
Issue Date	1999-01-20
URL	http://hdl.handle.net/2433/96544
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

研究会報告

複雑な相互作用をする粒子の集団の流れ

茨城大 理
粟津暁紀 (Akinori Awazu)

§1. 何を考えたいか

「流れ」は、日常どこにでもある現象である。例えば、水の流れ、風、人や車の流れ、砂の流れ、血液の流れ、熱や電気の流れ、など様々である。しかし同じ「流れ」ではあるが、すべてがいわゆる「流体」として扱い得るものであるわけではなく、様々な「物の流れ」が存在する。最近、そのようなものの一つである、細い管の中の粉体の流れ、または類似の現象と考えらている、高速道路上での交通流の研究が盛んに進められている。

しかし「物の流れ」という視点から見ると、こういった系は、個々の要素が比較的単純な相互作用しか行わない、やや特殊で理想的な系である。実際、例えば、形、硬さに異方性のある物や、長距離力による相互作用を行う物の集団等は、各要素間に働く力が単純ではなく、流れも複雑になると考えられる。

我々は、そのような一般的な「物の流れ」が、如何なる挙動を示し得るのか、という事に興味がある。そこで今回、やや複雑な相互作用をする粒子集団のモデル作り、そこから「物の流れ」の持つ多様性、法則性を考えていく。

§2. どのように考えるか

「複雑な相互作用をする粒子集団の流れ」を考える第一歩として、複雑な相互作用をする粒子集団の、簡単なモデルを考える。そこで今回我々は、Rule 184+a というセルオートマトンモデルを提案する。これは、交通流、粉体流の最も簡単なモデルと見做されるセルオートマトン Rule 184 に、簡単な速度変化のルールを盛り込んだメタモデルである。以下にモデルの具体的な形を示す。

空間、時間は離散的とし、各粒子は以下の方程式に従い運動する。

$$v_{n+1}^{i} = F(v_n^i, v_n^{i+1}, d_n^i) \tag{2.1}$$

$$x_{n+1}^{i} = x_n^i + v_{n+1}^{i} \tag{2.2}$$

ここで、iはある粒子の番号であり、その前方に存在する粒子の番号は$i+1$である。x_n^i、v_n^iは、時間nにおける粒子iの位置、速度であり、d_n^iは、粒子iと$i+1$の間にある空白格子数である。今回は簡単のため、関数$F(v_n^i, v_n^{i+1}, d_n^i)$と速度$v_n^i$は0もしくは1の2つの値をとるとし、$F()$は以下のルールに従うとする。

- $d_n^i > 1$ の時、$F(v_n^i, v_n^{i+1}, d_n^i) = 1$
- $d_n^i = 0$ の時、$F(v_n^i, v_n^{i+1}, 0) = 0$
- $d_n^i = 1$ の時、$F(v_n^i, v_n^{i+1}, d_n^i = 1)$ は粒子の種類に応じて、0もしくは1をとる。

ここで、粒子の種類について述べる。速度v_n^iは値0もしくは1をとるので、組合せ(v_n^i, v_n^{i+1})は、(0,0), (0,1), (1,0), (1,1) の4種類が存在する。そして$d_n^i = 1$の時、そのそれぞれに対し、Fは0もしくは1をとる。よって、$F(v_n^i, v_n^{i+1}, 1)$ に対し、$\{F(0,0,1) = 0,\ F(0,1,1) = 0,\ F(1,0,1) = 0,\ F(1,1,1) = 0\}$ から $\{F(0,0,1) = 1,\ F(0,1,1) = 1,\ F(1,0,1) = 1,\ F(1,1,1) = 1\}$ の計16種類のルールが存在する。ということで逆に、この16種類の$F(v_n^i, v_n^{i+1}, 1)$のルールの違いによって、種類の異なる16種類の粒子が定義される。これらの粒子の種類の名前として rule number 'a' を用い、rule number は Wolfram の方法に習い

$$a = 2^0 F_a(0,0,1) + 2^1 F_a(0,1,1) + 2^2 F_a(1,0,1) + 2^3 F_a(1,1,1) \tag{2.3}$$

と定義する。ここですべての粒子が'a'= 15 の時、この系はＣＡ rule 184 に帰着する。

この様に簡単なモデルにより、やや複雑な相互作用をする数種類の粒子を作ったので、実際にシミュレーションすることで、系の振舞いを見て行く。

§3. シミュレーション

今回、このモデルを用いて、まず純粋な1種類の粒子'a'からなる系の流れを、次に2種類の粒子を混合した系の流れを、周期境界条件のもとシミュレーションした。以下その結果を、粒子密度 'ρ' と Flow 'f' との関係図である「基本図」を中心に、簡単に見て行く。

3.1 純粋な1種類の粒子系の流れ

Figure.1は1種類の粒子系における典型的な基本図である。多くの種類の粒子系においては、基本的に従来の交通流、粉体流において見られるものと同様に、「自由流」「渋滞流」の二つの相が現れ、ρの変化に対し、相転移を起こす、といった現象が見られる((a),(b))。しかし$F()$に関して、ある共通の特徴的な相互作用ルールを持つ粒子からなる系では、(c),(d)の様に、ρの変化に対する流相の種類が1つ増える。また更に、別の共通のルールを持つ粒子からなる系では、ρの増化に対しfが増加する「自由流」的流れから、fが減少する「渋滞流」的流れへの転移が、2度発生する (Fig.1(e),(f)、Fig. 2)。このとき、ρの増化によって密度の薄い流相(「自由流」,「渋滞流」)から、密度の濃い流相(「自由流」的流れ,「渋滞流」的流れ)への転移が見られるのである。これは密度の薄い流体から濃い流体への転移、例えば気液転移に似ており、大変興味深い。

この様に、ある特徴的な相互作用を行う粒子系においては、粉体流、交通流に比べ、より多様な流相、相転移が発生することが分かる。

3.2 2種類の粒子が混合した系の流れ

次に異なる2種類の粒子が、数の割合1：1でランダムに存在しているときの、系の流れについて、見て行く。

混合する粒子の種類の組合せは多数存在するが、多くの場合 Fig.3(a) で表されているように、混合系の基本図は、混合する前の2種類の粒子の基本図を、ほぼ平均した

ような形になる。しかし、ある種類の粒子の組合せにおいては、ρに対する flow が、混合前に比べ激減し、更に流れが止まって「凝固」してしまうことある (Fig.3(b))。この様に、ある種の共通な相互作用ルールを持つ粒子は、また別の共通な相互作用ルールを持つ粒子の流れを妨げ、あたかも「凝固剤」の様に振舞う。つまりこの様な現象が、巨視的、散逸的な要素からなる系の混合においても、発生しうるのである。

§4. 分かったこと

今回、複雑な相互作用をする、粒子集団の流れの、簡単なモデルとして、Rule 184+a というセルオートマトンモデルを提案し、シミュレーションの結果を見てきた。それにより、ある特定の共通な相互作用ルールを持つ粒子系において、流相、相転移の種類の多様化や、異なる種類の粒子の混合による、系の流れの凝固、といった様々な現象が見られた。ここで、注意すべき事は、ただやみくもに相互作用を複雑にしただけでは、系の振舞いは多様化しないことである。多様化は、特定の相互作用ルールなどといった、何らかのメカニズムによって引き起こされている。よって、今回見られた多様な現象は、モデルの詳細に依らず発生すると考えられる。

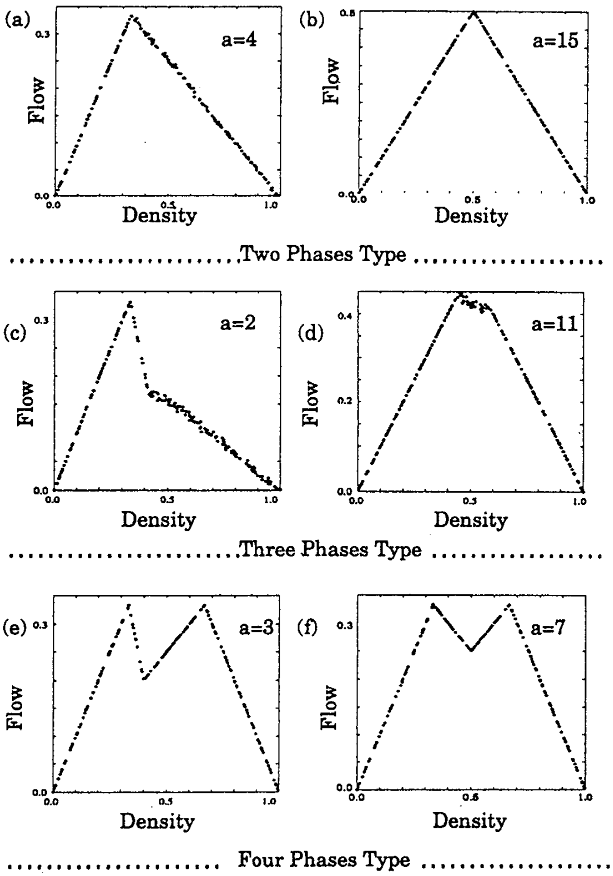

Fig.1: The typical fundamental diagrams for each 'a' . There are three types of fundamental diagrams, (a)(b) 2-type, (c)(d) 3-type, and (e)(f) 4-type.

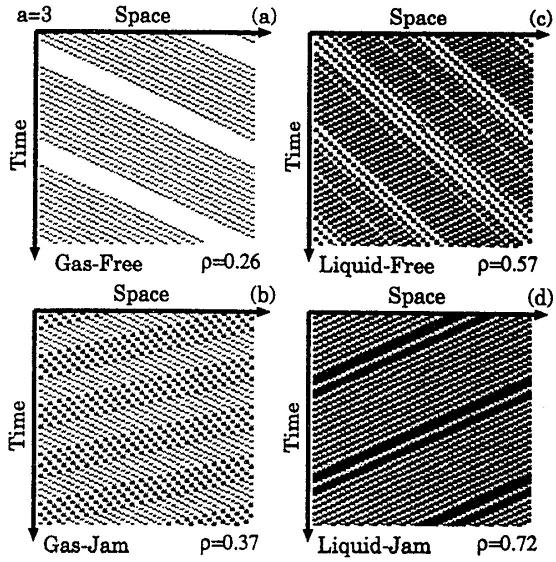

Fig.2: The space-time evolutions of the stationary states of 'a'= 3 particles system, respectively (a)gas-free-flow, (b)gas-jam-flow, (c)liquid-free-flow, and (c)liquid-jam-flow. Here, the dots represent individual particles which flow from the left to the right where black dots indicates $v = 0$ particles and gray dots means $v = 1$ particles.

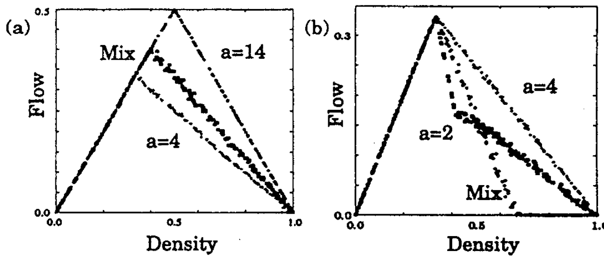

Fig.3:The typical fundamental diagrams of two pure particles systems and the mixed particles systems. The rate of particles is 1:1. (a)Decreasing type. (b) Decreasing type.

1) S.Wolfram: 'Cellular Automata and Complexity',Addison-Wesley. Reading. Massachusetts. (1994)
2) K.Nagel and M.Schreckenberg: J.Phys.I.France **2** (1992) 2221.
3) S.Yukawa, M.Kikuchi and S.Tadaki: J.Phys.Soc.Jpn. **63** (1994) 3609.
4) M.Bando, K.Hasebe, A.Nakayama, A.Shibata and Y.Sugiyama: Phys.Rev.E **51**, 1035 (1995).
5) G.Peng and H.J.Herrmann: Phys.Rev.E **51**(1995) 1745.
6) O.Moriyama, N,Kuroiwa, M,Matsushita, and H,Hayakawa: Phys.Rev.lett,**80**(1998)2833.
7) A.Awazu: 'The Dynamics of Rule 184+a:Thermo-dynamical Behavior of The Complex Materials Flow (preprint)